

Ирина Павловна Григал
 Анна Павловна Громова

Измерение вязкости жидкостей камертонно-зондовым методом

*Работа отмечена Дипломом победителя
 на VI Международной научно-технической
 конференции "Старт в Науку"*

Что такое камертон, известно многим. Почти каждый держал его в руках, наверняка не задумываясь, что это не только эталон частоты для музыканта, но ... и физический прибор для определения вязкости жидкости.

Вискозиметры (от латинского 'viscous', т.е. вязкость) - приборы для измерения вязкости - в настоящее время широко применяются в различных областях науки, техники и промышленности. По принципу работы существующие модели вискозиметров делят на четыре основные группы: капиллярные, ротационные, с падающим шариком, вибрационные.

Принцип действия капиллярных вискозиметров основан на определении вязкости по измерению скорости вытекания струи жидкости или газа из капилляра (рис. 1а). В ротационных вискозиметрах (рис. 1б) измеряется крутящий момент, передаваемый через исследуемую жидкость от одного цилиндра (конуса или сферы) другому. В вискозиметрах с падающим шариком вязкость определяется по установив-

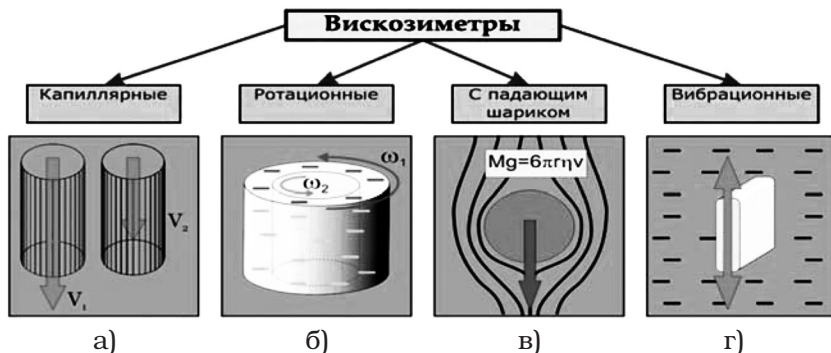


Рис. 1

шейся скорости падения шарика в исследуемой среде (рис. 1в). В вибрационных вискозиметрах вязкость определяется по затуханию колебаний зонда осциллятора, помещенного в исследуемую жидкость (рис. 1г).

Вискозиметры - достаточно дорогостоящие приборы. Большинство существующих моделей вискозиметров для измерений требуют сравнительно больших объемов жидкостей (100 и более мл), что не всегда возможно, например, при исследовании дорогих или токсичных жидкостей, а также при реологическом анализе крови. Кроме того, промышленно выпускаемые модели имеют не очень широкий диапазон измерений; внешние условия могут влиять на результаты эксперимента, а переградуировка приборов трудоемка.

В настоящей работе предлагается модель вискозиметра, принцип действия которого основан на измерении затухания звуковых колебаний высокочастотного камертона. В разработанной нами ранее методике измерения, исследуемая жидкость помещалась в виде капель на ножки камертона. Однако, если таким способом проводить измерения на жидкостях большой вязкости, то колебания камертона будут очень быстро затухать. Скорость затухания колебаний растет с увеличением площади соприкосновения жидкости с камертоном, поэтому при исследовании жидкостей большой вязкости предлагается проводить измерения с помощью тонких иглолок-зондов, опускаемых в исследуемую жидкость. Отличительной особенностью зондового метода является также невозмущающий характер измерений, что позволяет проводить исследования температурных зависимостей вязкости, не меняя существенно температуры исследуемой жидкости. Избегаются также неточности измерений, связанные с определением размеров капель, трудности, связанные с высыханием капель при длительных измерениях.

Применение обоих методов исследования вязкости позволяет измерять вязкость в режиме реального времени, используя малые объемы пробы (менее 0.1 мл) в широком диапазоне значений от 0.1 мПа с до значений свыше

10000 мПа с. Показания прибора не зависят от внешних условий (давление, температура и т.п.). Простота конструкции и доступность ее компонентов делает данную методику значительно дешевле, чем промышленно выпускаемые приборы. С помощью предлагаемой модели можно проводить исследования, имеющие практическое значение, в том числе и медицинские: исследование динамики свертывания крови.

Подобный прибор может также использоваться в учебной практике при проведении лабораторного эксперимента по темам: "Колебания", "Звук" и "Вязкость жидкостей".

Экспериментальная установка

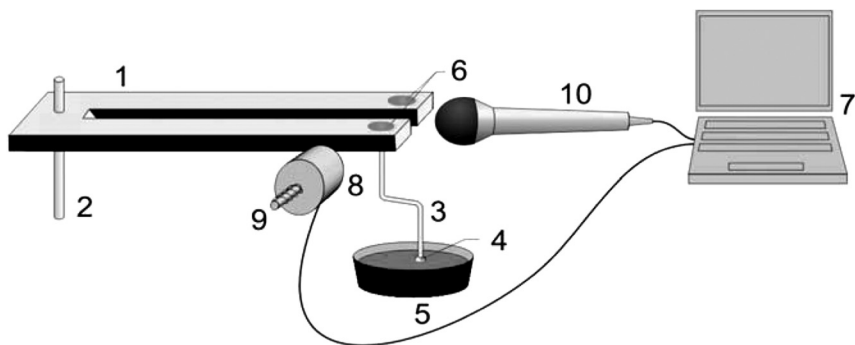


Рис. 2

Основная часть установки (рис. 2) - высокочастотный лабораторный камертон 1, закреплённый с помощью стержня 2. В зондовом режиме в одну из ножек камертона ввинчен изогнутый алюминиевый стержень 3, на конце которого находится шарообразный зонд 4 из пенопласта (используется материал с низкой теплопроводностью, чтобы исключить изменение температуры жидкости за счет отвода тепла через зонд). Зонд погружается в кювету 5 с исследуемой жидкостью, температуру которой можно изменять при помощи нагревательного элемента. Регистрация температуры производится при помощи термопары, помещённой в кювету. В "капельном" режиме жидкость помещается на ножки камертона в виде капель 6, площадь которых определяется при помощи окуляр-микрометра. Импульс с выхода звуковой

карты компьютера 7 усиливается и подается на соленоид 8. Колебания камертона возбуждаются втягивающимся в соленоид бойком 9. Запись звуковых колебаний осуществляется с помощью микрофона 10, подключённого к компьютеру 7.

Теория и методика измерений

Каждая молекула окружена со всех сторон "соседями". Тепловое движение молекул сводится в основном к колебаниям внутри потенциальной ямы, созданной ее ближайшим окружением (место временной локализации) и перескоками ее из одного места локализации в другое. Так, за одну секунду молекула жидкости меняет свое положение приблизительно 10^8 раз, совершая между перескоками $10^3 - 10^5$ колебаний. Минимальная энергия, необходимая молекуле для преодоления потенциального барьера сил взаимодействия с ближайшим окружением и перескока в новое положение равновесия, называется энергией активации жидкости.

Сущность явления внутреннего трения жидкости состоит в том, что молекулы, находящиеся под действием внешней силы, совершают перескоки преимущественно в направлении этой силы. Чем чаще способны молекулы жидкости перемещаться из одного положения равновесия в другое, тем меньше вязкость жидкости. С ростом температуры увеличивается энергия тепловых колебаний частиц, что ведет к уменьшению времени пребывания молекулы в положении равновесия, и, как следствие, к уменьшению вязкости.

Зависимость вязкости от температуры T и энергии активации жидкости ϵ_0 выражается формулой Френкеля:

$$\eta = Ae^{\frac{\epsilon_0}{kT}}, \quad (1)$$

где A - некоторая константа, ϵ_0 - энергия активации, T - абсолютная температура жидкости.

Прологарифмировав соотношение (1), получаем:

$$\ln \frac{\eta}{A} = \frac{\epsilon_0}{kT}. \quad (2)$$

Следовательно, энергия активации может быть найдена

как коэффициент линейной зависимости $\ln \eta$ от $\frac{1}{kT}$

Далее приводится вывод рабочей формулы, связывающей непосредственно измеряемую величину (декремент затухания колебаний камертона) с величиной вязкости жидкости.

Как известно, свободные колебания осциллятора затухают по экспоненте: $A = A_0 \cdot \exp(-\gamma \cdot t) \cdot \cos(\omega t)$, где коэффициент γ (декремент затухания) отвечает за быстроту затухания колебаний. То, что быстрота затухания зависит от того, в какую жидкость погрузить зонды, заметно даже "невооруженным ухом". Особенно велика эта разница для воды и глицерина (отличие вязкости \sim в 1500 раз); остальные гидродинамические свойства этих жидкостей отличаются не так сильно, поэтому справедливо предположить, что именно вязкость влияет на коэффициент γ .

Потери за период колебаний, вызванные действием вязкой силы, определяются формулой:

$$\Delta W_{\text{вяз}} = \Delta W - \Delta W_0 = k_{\text{эфф}} A_0^2 T (\gamma - \gamma_0), \quad (3)$$

где ΔW_0 - потери за счет излучения звука камертоном, при колебаниях зонда в воздухе (при этом считается, что силой вязкого трения, действующей на зонд в воздухе, можно пренебречь: $\eta_{\text{воздуха}} \sim 10^{-5} \eta_{\text{глицерина}}$); ΔW - полные потери за счет излучения и за счет вязкого трения при колебаниях зонда в жидкости; $k_{\text{эфф}}$ - эффективный коэффициент жесткости камертона; A_0 - амплитуда колебаний камертона, γ - декремент затухания при зонде, опущенном в жидкость, γ_0 - декремент затухания при зонде, колеблющимся в воздухе.

С другой стороны, потери за период колебаний:

$$\Delta W_{\text{вяз}} = \int_0^T N \cdot dt = T \frac{\eta \cdot V_0^2}{l} I, \quad (4)$$

где $N = F \cdot V$, мгновенная мощность силы вязкого трения, F - мгновенная сила и V - мгновенная скорость; $V_0 = \omega A_0$ - амплитуда скорости; l - характерное расстояние, на котором колебания, сообщаемые зондом жидкости, затухают в e раз; I - интегральный коэффициент, имеющий размерность

площади, учитывающий форму и размеры зонда, а также сдвиг фаз между колебаниями скорости и силой вязкого трения. В случае зонда цилиндрической формы коэффициент пропорционален глубине погружения зонда ($I \sim h$). Интегральная сила F является суммой вязких сил, действующих на различные элементы поверхности зонда ΔS , определяемых формулой Ньютона:

$$\Delta F = \eta \Delta S \frac{\partial V}{\partial r}, \quad (5)$$

где $\partial V / \partial r$ - убывание скорости слоев жидкости с изменением расстояния от поверхности.

Характерное расстояние l , на котором колебания жидкости затухают в e раз, определяется формулой (6):

$$l = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega \cdot \rho}}, \quad (6)$$

где ω - частота колебаний, ρ - плотность жидкости. Приравнивая (4) и (3) и учитывая (6), получаем рабочую формулу

$$\eta = \frac{K}{\rho} (\gamma - \gamma_0)^2, \quad (7)$$

где K - коэффициент пропорциональности; ρ - плотность жидкости, а $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0$ - разность декрементов затухания колебаний камертона при погружении зонда в жидкость и на воздухе. Коэффициент пропорциональности K может быть определен путём калибровки камертона. Калибровка представляет собой серию измерений на различных жидкостях, динамическая вязкость которых считается известной, например, водных растворах глицерина. K определяется как коэффициент линейной зависимости η от $\Delta\gamma^2$.

Для получения температурной зависимости вязкости исследуемой жидкости проводится серия измерений декремента затухания камертона (декремент затухания за счет излучения γ_0 определяется непосредственно перед проведением измерений) при различных значениях температуры жидкости, которая регистрируется с помощью термопары (с разрешением в 1 градус) и затем вводится в компьютер. Данные о затухающих колебаниях обрабаты-

ваются в режиме реального времени специально написанной программой (временное разрешение составляет ~ 1 с), которая выдаёт на экран график зависимости вязкости от времени. По окончании измерений программа на основании введённых значений температуры рассчитывает промежуточные значения в моменты времени, соответствующие измерениям, и производит расчет энергии активации исследуемой жидкости, используя метод наименьших квадратов, по формуле (2).

Результаты

В ходе работы исследовалась зависимость разности декрементов затухания от глубины погружения зондов, приведена на рисунке 3. Экспериментально полученная зависимость совпадает с теоретическими предсказаниями ($I \sim h$). Разброс экспериментальных значений при малых глубинах погружения вызван капиллярными эффектами, а при больших - близостью камертона и поверхности жидкости, поэтому целесообразно проводить измерения в среднем диапазоне глубин погружения.

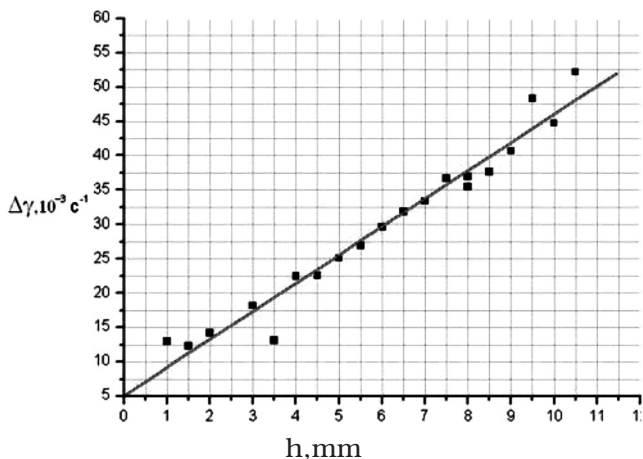


Рис. 3

Также была определена энергия активации глицерина по формуле (2). График зависимости $\ln \eta(1/kT)$ приведен на рисунке 4 (Значение вязкости приведено в относительных единицах).

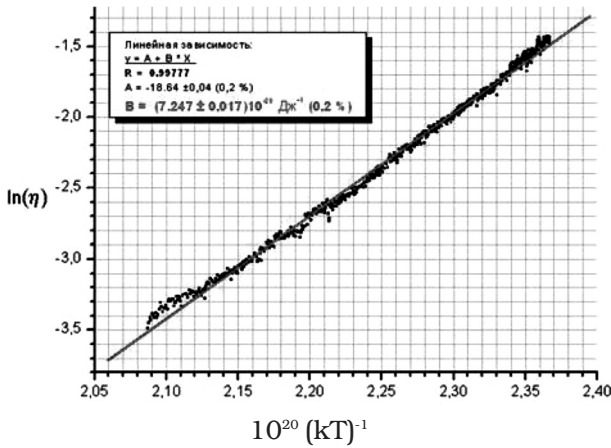


Рис. 4

Значение энергии активации глицирина, полученное нами, составило $(7.247 \pm 0.017) \cdot 10^{-20}$ Дж, что на 15% меньше справочного значения $((8.341 \pm 0.087) \cdot 10^{-20}$ Дж) [8], рассчитанного в данном температурном диапазоне ($70 \div 30$ градусов), что, вероятно, вызвано примесью воды в глицерине (нагревание глицирина происходило в водяной бане).

Небольшие отклонения экспериментальной зависимости от прямой в её нижней части вызваны, скорее всего, отводом тепла металлическим стержнем, который контактировал с жидкостью. В дальнейших экспериментах планируется устанавливать зонд таким образом, чтобы исключить этот контакт.

Заключение

Предложена камертонно-зондовая методика измерения вязкости жидкости в широком интервале значений величин, позволяющая проводить измерения в режиме реального времени, не внося существенных температурных и других возмущений в объект исследования. Измеренные температурные зависимости вязкости глицирина хорошо согласуются с теоретической моделью зависимости вязкости от температуры и свидетельствуют о высокой точности метода. Определено значение энергии активации для используемого глицирина с небольшой примесью воды, находящейся в хорошем соответствии со значением энергии активации чистого глицирина.

Благодарности

Работа выполнена на Физическом отделении Всероссийской Летней Экологической Школы (ФИЗЛЭШ) <http://fizlesh.msk.ru>. Выражаем благодарность Миронову Михаилу Арсеньевичу за консультации и первоначальную идею эксперимента.

Литература

1. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. - М. 1979.
2. Расулов С.М., Хамидов М.М. Установка для одновременного измерения давления, температуры, объёма и вязкости жидкостей и газов // Приборы и техника эксперимента, 1999. - Т. 42. - №1, с. 148-150.
3. Малая медицинская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1991. - Т. 2. - С. 556.
4. Жданов А.Г., Пятаков А.П. Измерение динамической вязкости жидкости по затуханию колебаний камертона // Физическое образование в вузах. 2002. - Т. 8. - №4. - С. 117-126.
5. Агафонов И.Н., Жданов А.Г. Исследование динамики свёртывания крови. Материалы Международного молодёжного научного конгресса "Молодёжь. Наука. Общество", М., 2003. - С. 24.
6. Физические величины. Справочник под редакцией И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Печатается по материалам вестника
Московского государственного университета
"ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК",
специализированный выпуск "ФИЗИКА",
стр. 142-147, № 3(34), 2004.